

Diseño de un registrador de esfuerzos para maquinaria agrícola

Matías J. Micheletto, Gabriel M. Eggly, Rodrigo Santos

Dep. de Ingeniería Eléctrica y Computadoras - IIE Universidad Nacional del Sur - CONICET

Resumen La agricultura de precisión requiere de herramientas tecnológicas para la adquisición, registro y procesamiento de la información. La incorporación de los sistemas embebidos a la maquinaria agrícola permite realizar el control y monitoreo de forma constante y precisa de las variables que influyen en el rendimiento y afectan a la correcta utilización de la maquinaria. La eficiencia del tractor agrícola puede determinarse como la relación entre el consumo de combustible y la energía mecánica producida que es aprovechable por la maquinaria que realiza la labor. Esta última puede medirse utilizando transductores de fuerza como las celdas de carga o de rotación de partes móviles utilizando sensores inductivos. En este trabajo se desarrolló un sistema electrónico para medir y registrar los datos obtenidos de celdas de carga y sensores inductivos a fines de generar la información requerida para realizar posteriores análisis de la eficiencia de la maquinaria agrícola sometida a pruebas de rendimiento. Además se detallan los aspectos principales del proceso de desarrollo, diseño de hardware y software, cuestiones de implementación y resultados experimentales obtenidos en las pruebas de laboratorio.

Keywords: Sistemas embebidos, agricultura de precisión, celdas de carga, sensores inductivos.

1. Introducción

Los sistemas electrónicos inteligentes o sistemas embebidos (SE) son aquellos basados en un procesador que cumplen una función dentro de un sistema más grande. Los SE interactúan con el medio ambiente que los rodea o con las personas por medio de unidades de entrada/salida. Entre lo más habitual encontramos displays y teclados, un puerto de comunicación para acceder a datos almacenados y distintos tipos de sensores y actuadores digitales y/o analógicos. Esta clase de sistemas se generalizó a partir de la reducción en los costos de los microcontroladores y la miniaturización de dispositivos.

En los últimos años el uso de las plataformas de hardware abierto como Arduino, Raspberry o Beagleboard entre otras [1–3] permitió el desarrollo de SE de bajo costo que permiten resolver distintos problemas sin necesidad de realizar el diseño completo. Estas plataformas presentan interfaces abiertas en

las cuales los desarrolladores de sistemas y aplicaciones pueden conectar sensores y actuadores varios. Habitualmente disponen de una interface de programación sencilla en lenguaje C y una amplia comunidad que publica sus desarrollos tanto en hardware como en software. Este nuevo modo de desarrollar sistemas ha potenciado la realización de proyectos bajo el paradigma *commercial off-the-shelf* (COTS) que se basa en la implementación de sistemas en base a componentes discretos existentes en el mercado.

El costo de producción es uno de los factores principales en cualquier tipo de actividad económica. Reducir los costos de producción es uno de los principales mecanismos para mejorar la eficiencia y por lo tanto la productividad. En el caso de actividades agrícolas, especialmente aquellas relacionadas a la producción de cultivos, los principales costos están asociados al uso de maquinaria agrícola, ya sean para labranza, pulverización, siembra o cosecha. Los costos operativos dependen de varios factores, entre los cuales el combustible es el principal. En el caso de labranza y siembra, el consumo de combustible depende, entre otras, de los esfuerzos de tracción y la dureza del suelo. Mediante la medición de estas variables puede estimarse la eficiencia de la maquinaria [4].

Al igual que en las demás actividades económicas, el productor agropecuario debe decidir varias cuestiones al inicio de cada ciclo productivo. La correcta elección de la maquinaria es un punto fundamental de la estructura de costos ya que se relaciona directamente con la eficiencia y la productividad. El productor debe además evaluar la forma en que se utiliza la maquinaria y tener en cuenta los costos de reparación en caso de fallas [5].

A pesar de que la maquinaria agrícola se ha tecnificado mucho en los últimos años, el uso de sistemas embebidos de medición de esfuerzos en este tipo de tareas no es generalizado y la incorporación de este tipo de instrumental en máquinas que no son de última generación no es simple y se debe acondicionar. La opción de realizar un registrador universal de esfuerzos para evaluar el desempeño de una máquina agrícola de siembra o arado resulta entonces de interés para una economía basada en la producción agropecuaria como la de Argentina. El tema fue abordado en [6] y en [7]. En el primero se plantea un dispositivo similar para celdas de carga pero que no incluye el deslizamiento de las ruedas del tractor. En este caso además el dispositivo no se amura a una máquina como el tractor sino a dispositivos de labranza más elementales utilizados en el ámbito de la agricultura familiar. En el segundo caso, se trata de una tesis de maestría en la cual realizan un sistema electrónico para medir el consumo de combustible en un tractor agrícola. En este caso el dispositivo relaciona el esfuerzo medido en la toma de fuerza de la máquina con el consumo de combustible.

En este trabajo presentamos el diseño, implementación y evaluación de un SE registrador que puede ser utilizado sobre cualquier maquinaria agrícola, de arrastre o suspendida, para medir los esfuerzos de tracción en distintos puntos de la misma, determinar el coeficiente de deslizamiento de la maquinaria propulsora y la velocidad del motor.

2. Requerimientos

En esta sección los requerimientos funcionales y no funcionales del sistema son descriptos junto con a la selección de componentes que permitan satisfacerlos. El sistema debe ser capaz de muestrear y registrar todas las variables con una frecuencia mínima de 2 Hz. Se requiere medir la velocidad de la toma de potencia en revoluciones por minuto, tomado este valor en la estría del eje y también la velocidad de rotación de las cuatro ruedas del tractor. Este es un requisito importante ya que mide la potencia entregada por la máquina, en relación al anterior requerimiento, brindan información sobre el rendimiento. Finalmente se requiere la medición de fuerza entregada por medio del uso de las denominadas celdas de carga que permiten determinar los esfuerzos a los que está sometida la maquinaria, y mediante la velocidad de avance de la misma se podrá determinar la potencia. El registrador debe poder tomar lecturas de 4 celdas en paralelo. El sistema debe ser capaz de registrar los datos durante intervalos de al menos 15 minutos, que es el tiempo promedio que le lleva recorrer un sector de lote de labranza. Desde el punto de vista estructural, el sistema debe ser portátil y adaptable a diferentes maquinarias, tolerar un rango de temperatura variable de entre 10°C bajo cero y 40°C y lluvias. A pesar de que el registrador será utilizado por técnicos especializados, debe tener una interfaz hombre-máquina sencilla para facilitar su configuración en el campo. El operario puede iniciar o detener el muestreo mediante un pulsador instalado en la carcasa del registrador o mediante un control alámbrico, que debe informar con un indicador visual el estado del sistema, ya sea detenido o grabando muestras. Además de estos requerimientos sobre el sistema, un software sencillo para instalar en una computadora personal estándar debe ser desarrollado a fin de poder obtener los datos medidos para su posterior procesamiento de manera práctica.

3. Implementación del Hardware

En esta sección se describen las diferentes partes funcionales constitutivas del registrador, se detallan las características requeridas, el acondicionamiento de las señales y el modo en que se implementaron. En la Fig. 2 se muestra un diagrama simplificado de los componentes del sistema, donde se destacan principalmente, en el interior del gabinete, tres bloques: el microcontrolador, el módulo de almacenamiento y el reloj de tiempo real. Por fuera del gabinete se dispone de cinco sensores inductivos, cuatro celdas de carga y un pulsador para iniciar o detener el registro de los datos. La conexión a la PC puede realizarse mediante un cable USB para la descarga de los registros de medición.

3.1. Selección de la plataforma de hardware

En la elección de la plataforma de hardware se tuvieron en cuenta varios aspectos. En primer lugar, el hardware debe estar disponible en Argentina, lo cual es una limitación importante dadas las restricciones económicas del sector.

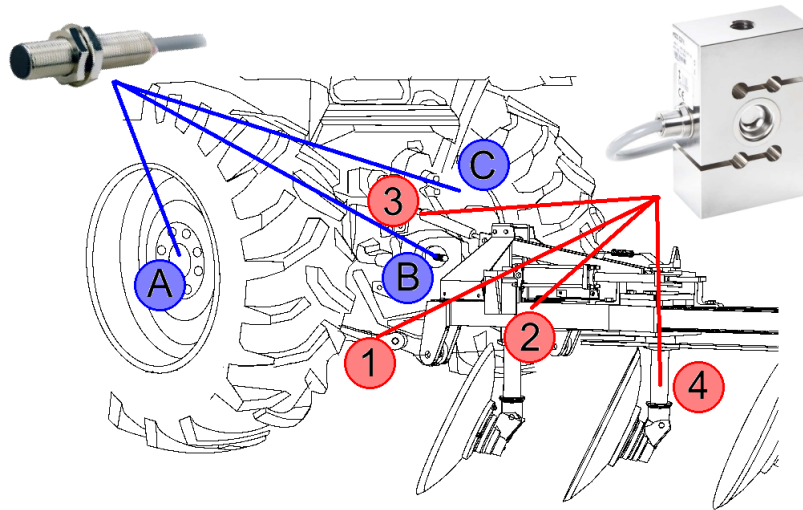


Fig. 1: Sensores inductivos en ruedas traseras (A y C) y en toma de fuerza (B). Celdas de carga en enganche de tres puntos (1, 2 y 3) y en otras partes de la maquinaria (4).

Segundo, los componentes elegidos deben tener asegurados varios años de producción en adelante. Por último, la cantidad de puertos y dispositivos debe ser tal que pueda manejarse todo el sistema desde un único microcontrolador. Bajo estas restricciones hemos elegido un microcontrolador Atmel, modelo ATmega 328, que satisface todos los requerimientos mencionados.

El ATmega 328 cuenta con 6 conversores A/D de 10 bit, 10 interrupciones por cambio de estado de los pines, tres timers, SPI para controlar un módulo de lectura/escritura de memorias SD y cuenta con una gran comunidad de desarrollo. La plataforma abierta Arduino provee un excelente kit de desarrollo de sistemas COTS, una interfaz de desarrollo simple y una gran librería de repositorios.

3.2. Medición de RPM

Para el cálculo de la potencia que desarrolla el motor se emplea la curva característica de potencia propia de cada motor y que puede determinarse previamente de manera experimental. En el procedimiento se aplica un freno dinámico o freno Prony en la toma de fuerza (PTO, por sus siglas en inglés) y se mide la potencia de salida en función de las revoluciones por minuto (rpm) de la PTO que a la vez se relaciona linealmente con las rpm del motor. Por lo tanto, conociendo la velocidad de rotación del eje de la PTO se puede estimar, para los fines prácticos, la potencia disponible del motor para realizar trabajo

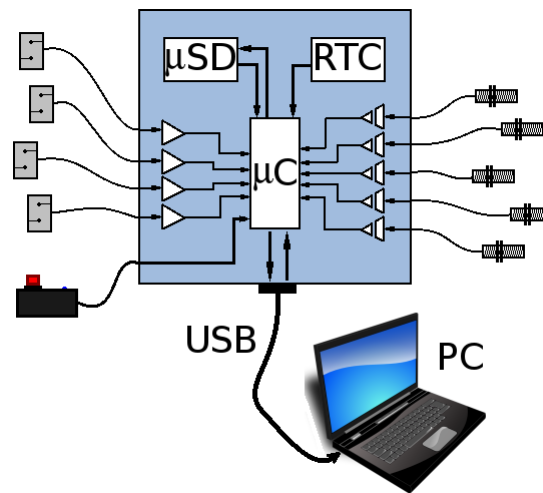


Fig. 2: Diagrama de los componentes del sistema.

de tracción, con lo cual, las rpm de la PTO es una variable a medir y registrar con el instrumento.

La velocidad de avance del tractor se puede determinar según la velocidad de rotación de las ruedas multiplicando este valor por el factor de deslizamiento. Si bien pueden emplearse técnicas velocimétricas más precisas como las basadas en GPS, conocer la velocidad de rotación de las ruedas es relevante en la determinación de la eficiencia de la transmisión y el deslizamiento relativo del tractor en vacío o con carga. El deslizamiento indica en parte la característica del suelo sobre la que traccionan las ruedas y también la cantidad de potencia que se está perdiendo sin ser utilizada plenamente por la labor de la máquina.

Para el caso de tractores con tracción en ambos ejes, doble tracción o tracción asistida se desea medir rpm de las cuatro ruedas, con lo cual, el registrador debe disponer de cinco canales para medición de rpm, una para cada rueda y otra para la PTO.

Los sensores inductivos son una buena opción para instalar en la maquinaria porque no requieren de la colocación de piezas adicionales como los sensores ópticos o de efecto hall, aunque resultan mucho más costosos. El sensor utilizado es marca SAIA modelo XVJ B12G21/L y requiere una alimentación de 12V. Para adaptar la señal a TTL se utilizaron optoacopladores TLP521.

3.3. Medición de esfuerzos de tracción

Las maquinarias con las que se va a realizar las mediciones de eficiencia tendrán instalado como máximo cuatro celdas de carga en diferentes puntos de manera de medir los esfuerzos de tracción a los que están sometidas durante su operación. Las celdas de carga disponibles son de marca Flexar, modelo S-Type

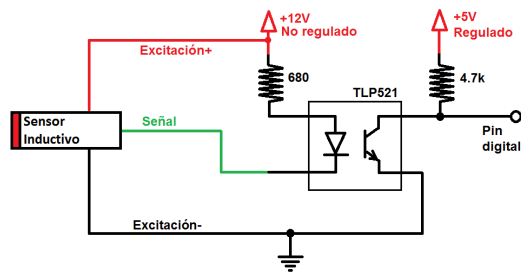


Fig. 3: Esquema de conexión de los sensores inductivos.

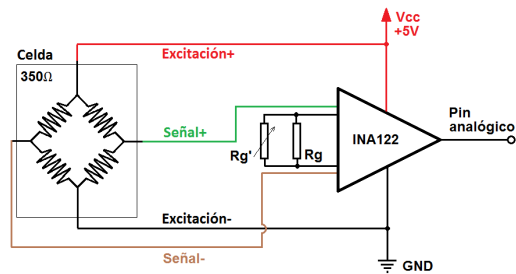


Fig. 4: Esquema de conexión de las celdas de carga.

CZC, de distintas capacidades y una sensibilidad de 2mV/V. La alimentación utilizada para el puente es de 5V regulado. Para amplificar la señal diferencial de las celdas de carga se emplearon amplificadores de instrumentación INA122AP, de alimentación simple y con un valor de ganancia de voltaje de 518.

3.4. Registro de datos

Todos los datos medidos son registrados en archivos de texto en una memoria micro SD que se comunica con el microcontrolador por medio de una interface SPI a través de un módulo uSD Card Adapter Catalex 1.0. Para acceder a la fecha y hora actuales se utilizó el circuito integrado DS1307 que posee una interface I²C y se mantiene actualizado gracias a la alimentación de una pila tipo botón CR2032 de 3V. Cada vez que se inicia una nueva grabación se crea un nuevo archivo de registro que contiene una primera línea con una estampa de tiempo y a continuación se escribe una línea por medición que contiene el número de muestra, los valores de los cuatro canales analógicos a los que están conectados las celdas de carga y los valores de los cinco contadores de pulso de los sensores inductivos. Los archivos podrán ser luego descargados a una PC mediante el software correspondiente que se detallará en la Sección 4.

3.5. Fuente de alimentación

La fuente de alimentación disponible puede ser una o dos baterías de automóvil de 12V y su tensión puede variar entre 10V y 15V durante la operación del tractor dependiendo del consumo o la carga del alternador. Debido a que el microcontrolador, los amplificadores de instrumentación y el módulo micro SD requiere una alimentación de 5V, se diseñó una fuente conmutada de 5V regulada basada en el circuito integrado LM2575. Esta fuente provee una corriente máxima de 1A, aunque el máximo consumo de todo el sistema no supera los 500mA. La fuente cuenta con una protección por exceso de corriente que es limitada con un fusible polyswitch de 1A, una protección por exceso de voltaje implementada con un varistor de 25V y mediante un puente de diodos se evita que haya alimentación con polaridad invertida.

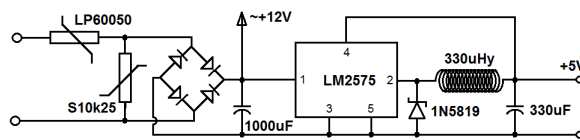


Fig. 5: Esquemático del circuito de alimentación.

3.6. Montaje

Se diseñó una placa de circuito impreso doble faz de 93 x 130 mm. y se instaló en una carcasa de polivinil de dimensiones 85 x 195 x 160 cm. que permite mantener los componentes electrónicos al resguardo de las condiciones adversas en las que el dispositivo debe operar. Todos los sensores, los cables de alimentación y el pulsador se acoplan a la carcasa mediante conectores tipo SVP que se ajustan a rosca. Para la conexión USB se empleó un conector DB9 ya que permite un acople más firme que los utilizados en la norma correspondiente. Se dispone de un led brillante azul que indica que el registrador está encendido y otro de color rojo para conocer el estado de la grabación o la ocurrencia de errores.

4. Software

4.1. Software del microcontrolador

El firmware se programó utilizando la IDE de la plataforma Arduino donde se incluyeron las librerías SD.h para controlar del módulo lector de memoria micro SD y Wire.h y RTCLib.h para el manejo del circuito RTC.

En primer lugar se inicializa el puerto serie configurando la velocidad de transmisión a 115200 baudios y luego se habilita las interrupciones de cambio

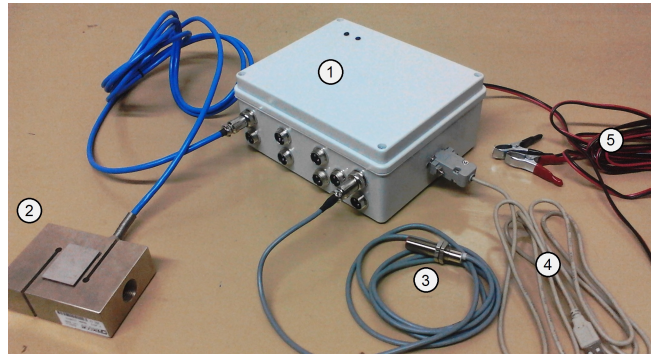


Fig. 6: Referencias: 1- Registrador. 2- Celda de carga. 3- Sensor inductivo. 4- Conector USB. 5- Cable de alimentación.

de estado para cinco de los pines digitales. Para realizar el conteo de pulsos se dispone de un arreglo de cinco elementos tipo boolean con los cuales se determina si el llamado a la rutina de interrupción se realiza con el flanco ascendente o descendente del pulso y además permite identificar cuál de los pines produjo la interrupción o si hay más de uno que cambió de estado simultáneamente. Por otro lado se cuenta con un arreglo de cinco elementos de variable entera con los que se realiza el conteo de pulsos generados por los sensores inductivos.

Tabla 1: Comandos del protocolo de comunicación.

Comando	Función	Ejemplo	ACK
a\n	Solicitud de lista de registros.	—	%
bLOG_xxx\n	Solicitud de descarga del registro número xxx.	bLOG_008\n	#
cLOG_xxx\n	Solicitud de eliminación del registro número xxx.	bLOG_034\n	\$
xxxxxxxxxxxxxxxx\n	Actualizar fecha y hora según el formato aaaammddhhmmss.	e20150914103826\n	—
r\n	Solicitud de lectura de celdas de carga.	—	&

Cuando el usuario inicia la grabación de datos, se crea un nuevo archivo de registro en la memoria SD, se solicita la fecha y hora actuales al RTC y se escribe la estampa de tiempo en la primera línea del registro. En caso de que por algún motivo no pueda realizarse alguna de las operaciones anteriores, el sistema entra en un estado de error en el que se alerta al usuario mediante el parpadeo de un led indicador de estado con lo cual se debe reiniciar el programa para volver a intentar la operación. Cuando este procedimiento se completa con

éxito, se deshabilitan las interrupciones por eventos del puerto serie y se procede al muestreo de datos ejecutando las tareas correspondientes.

El sistema tiene un bajo factor de utilización y ejecuta un conjunto de tareas síncronas con un periodo de 500ms, las cuales consisten en leer el valor del conversor A/D para cada uno de los cuatro pines analógicos con los que se mide los esfuerzos de las celdas de carga y luego registrar los valores sin procesar junto con los de los contadores de pulsos en el archivo de registro actual. Al finalizar el registro de los datos se verifica que el usuario no haya detenido la grabación mediante el pulsador. En caso de que así sea, se apaga el led indicador y se vuelve a habilitar las interrupciones del puerto serie para admitir la comunicación con la PC.

Mediante los comandos del protocolo de comunicación del registrador se puede manejar la información almacenada en la memoria SD. Se admiten tres operaciones fundamentales: listado, descarga y eliminación de registros. En la primera se enumera la lista de registros con su número de identificación, fecha y hora del inicio del mismo y su tamaño en bytes. En caso de solicitar la descarga de un registro particular, se transfieren los datos en forma secuencial y en caso de eliminación se borra la información correspondiente de la memoria.

En la Tabla 1 se muestra el protocolo de comunicación implementado.

4.2. Software de la PC

La aplicación para PC se programó en C++ usando la librería Qt5.4 para la interfaz gráfica de usuario y QExtSerialPort 1.2 para la comunicación serie. Cuando se ejecuta el programa, se debe indicar el puerto serie al que se encuentra conectado el registrador y automáticamente se procede a la descarga de la lista de registros. Los nombres de los registros se listan en una tabla donde se sugiere un nombre de archivo que contiene la fecha y hora en que se realizó la medición y también se indica el tamaño de cada registro en bytes. El usuario puede seleccionar tantos archivos como desee de la tabla para descargar o eliminar. Al seleccionar un archivo para descargar, se solicita indicar un directorio para guardar el o los registros seleccionados y la opción de modificar el nombre del archivo de texto. Mediante una barra de progreso se indica el estado de la descarga.

En caso de agotarse la pila del registrador se desactualiza la fecha y hora del sistema con lo cual debe reingresarse nuevamente, para ello el programa dispone de un menú que permite ajustar nuevamente el reloj del registrador al tiempo actual.

Para realizar operaciones de calibración de las celdas de carga se dispone de una ventana que indica los valores actuales de las lecturas analógicas correspondientes a los pines donde se encuentran conectadas las celdas de carga de modo de poder ver en tiempo real cuál es el esfuerzo que se está midiendo.

Como las librerías Qt admiten la compilación de software para las plataformas Windows, Linux y Mac, el software desarrollado se puede instalar en cualquiera los sistemas operativos mencionados.

Registro	Nombre de archivo	Tamaño (bytes)
LOG_008	2015_11_11_19_15_12.txt	7794
LOG_010	2015_11_18_18_41_34.txt	567
LOG_014	2015_11_19_21_13_52.txt	3296
LOG_015	2015_11_19_21_24_13.txt	2000
LOG_016	2015_11_19_22_5_24.txt	625
LOG_017	2015_11_19_22_5_45.txt	864
LOG_001	2015_07_12_08_21_13.txt	4398
LOG_024	2015_07_12_08_27_18.txt	53586
LOG_023	2015_07_12_08_48_21.txt	20093
LOG_021	2015_07_12_08_01_03.txt	30325
LOG_013	2015_07_12_09_27_42.txt	60158
LOG_012	2015_07_12_10_20_53.txt	54733
LOG_011	2015_07_15_10_21_03.txt	56933
LOG_009	2015_07_18_14_40_23.txt	4398

Fig. 7: Ventana del software para PC.

5. Pruebas experimentales

Durante la medición de deslizamiento se realiza el conteo de pulsos generados por los sensores inductivos. Estos pulsos se cuentan detectando el cambio de estado de cada uno de los cinco pines digitales del microcontrolador y esta operación se efectúa en una rutina de interrupción. Si la frecuencia de la señal es muy elevada, el microcontrolador no alcanzará a procesar todas las interrupciones con lo cual aparece un error de medición. Para determinar este error de forma experimental, se simuló la señal generada por los sensores, utilizando un segundo microcontrolador cuyas salidas digitales alternaban sus estados en forma pseudoaleatoria a diferentes frecuencias. Al final del procedimiento de unos 10 minutos de duración a distintas frecuencias se comparó el recuento de pulsos de ambos microcontroladores para estimar el error en función de la frecuencia, con lo cual se obtuvo la gráfica de la Figura 8.

Como puede observarse, a partir de una frecuencia de 50Hz el error relativo supera el valor del 0.1% y permanece entorno al 0.12% para una frecuencia de hasta 200Hz. Se estima que para un caso típico, el tractor avanza a 10 Km/h, con el sensor inductivo instalado de manera que detecte seis pulsos por vuelta en una rueda de 1,5 m. de diámetro, la señal generada es de 3,54Hz. Para el caso de la toma de potencia, la velocidad nominal es de 1000 rpm, y suponiendo seis pulsos por vuelta la frecuencia de la señal generada es de 100 Hz. De esta manera se considera que el error es muy bajo en medición de frecuencia, sin embargo, debido que se tienen seis pulsos por vuelta, el error en la medición de distancia recorrida corresponde a la longitud de arco sobre el perímetro de la rueda para

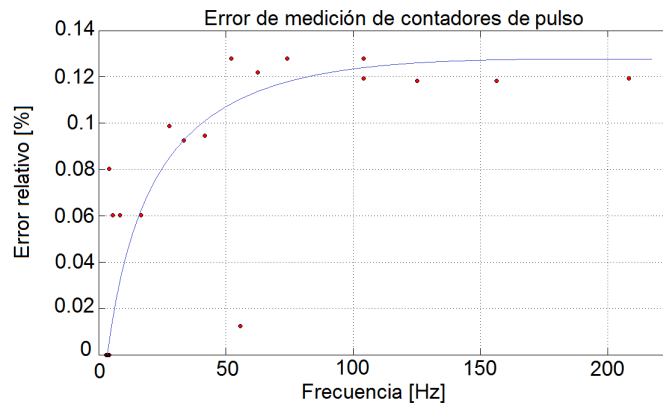


Fig. 8: Error relativo en medición de frecuencia.

un ángulo de 60° , que significa una distancia de 78,54 cm en el caso de una rueda de 1,5m de diámetro.

6. Conclusión

El sistema embebido diseñado integra en un dispositivo la posibilidad de sensar simultáneamente la carga de la máquina y el deslizamiento de sus ruedas. Esta información es almacenada para su posterior procesamiento. El sistema fue construido en base a componentes presentes en el mercado local de fácil acceso y económicos. Los datos se utilizarán por el Ingeniero Agrónomo a fin de evaluar la performance de la máquina y de manera indirecta parámetros del tipo de suelo. Si bien el registrador todavía no fue evaluado en campo, las pruebas realizadas en el laboratorio muestran que trabaja correctamente. A saber, las celdas de carga fueron evaluadas con cargas conocidas y la respuesta fue correcta; los sensores inductivos detectan el paso de los tornillos de una rueda de manera correcta. Si bien la condición en el campo puede ser diferente, la celda de carga medirá el esfuerzo de una máquina acoplada pero si este esfuerzo se encuentra dentro del rango especificado deberá entregar la lectura adecuada. Lo mismo en cuanto al deslizamiento de las ruedas que se calcula por la cantidad de revoluciones registradas comparada con la distancia recorrida y el diámetro de la rueda. Los requerimientos demandados fueron satisfechos en cuanto a la frecuencia de medición y rango de fuerzas, así como la cantidad de datos a almacenar (dimensión de la memoria) y duración de la medición.

El equipo se ensambló y construyó en una caja estanca resistente a los golpes. Sus componentes operan en el rango de temperaturas previsto para su uso en el campo. Tiene dimensiones y peso que permiten su traslado sin dificultades. El software desarrollado para la PC es muy simple y su uso es intuitivo. Como se

muestra se utilizan ventanas con menus autocontenidos. Una ventaja importante que puede ser ejecutado sobre diferentes sistemas operativos.

Referencias

1. <https://www.arduino.cc/>
2. <https://www.raspberrypi.org/>
3. <http://beagleboard.org/bone>
4. Ricardo E. Garbers, Yi Erh Chen, *Costos Operativos de maquinaria agrícola (Síntesis básica para su cálculo)*. [Disponible] http://www.agroindustria.gob.ar/site/agricultura/contratistas_rurales/30_costos_y_precios_de_labores/_archivos/140101_Manual\%20de\%20Costos\%20Operativos\%20de\%20Maquinaria\%20Agr\%C3\%ADcola.pdf
5. Terry Kastens *Farm Machinery Operation Cost Calculations*. [Disponible] <http://www.coffey.k-state.edu/farm-management/Farm\%20Machinery\%20operation\%20Cost\%20Calculations.pdf>
6. Leonardo Venturelli, Andrés Moltoni, Silvina Esparza Ignacio Huerga Gabriela Giordano Pedro Valderrama Juan Regazzoni, Tracción de implementos en la agricultura familiar. Desarrollo de instrumental para medir fuerza de tiro y potencia. <http://agroelectronica.inta.gob.ar/sites/agroelectronica.inta.gob.ar/files/u2/27.\%20traccion\%20de\%20implementos\%20en\%20a\%20agricultura\%20familiar.pdf>
7. Amalia González Cadenas, Diseño y construcción de un medidor electrónico de un medidor electrónico de consumo de combustible para tractores agrícolas. <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/handle/123456789/3871>